

人の動きを再現するロボット

東京理科大学 先進工学部 機能デザイン工学科 教授 よしだ 吉田 えいち 英一

1. はじめに

ロボットの中でも、人の形をしたロボット（以下、人型ロボット）は、「ヒューマノイドロボット」とも呼ばれ、皆さんがロボットと聞いてすぐ想像するロボットのひとつではないでしょうか。人型ロボットの実現には、ロボットの機構設計やセンシング、制御、さらに知能を有効に統合する必要があります。1990年代から多くの大学や研究機関、ホンダやトヨタを含む企業などが技術の結晶として様々な人型ロボットを開発してきました。最近の技術や人工知能の一層の進展により、YouTubeの動画で宙返りなどアクロバットな動きを披露して世界を驚かせている Boston Dynamics 社の Atlas など、人型ロボットは進化を続けています。本稿では、その研究の一つとして「人の動きを再現する」ことを取り上げ、その背景や実現方法、応用などについて紹介します。

2. なぜ人型ロボットを研究するのか

「人型ロボット」の定義にもいろいろあり、人のような上半身と車輪型移動機構を組み合わせたロボットもそれに含まれます。本稿では、二本の腕と足を持ち、歩行や両手の作業が可能なロボットを対象とします。筆者は、研究動機には大きく二つあると考えています。

人型ロボットは、まだ家庭や工場などに広く普及しているとは言えません。工場などでの定型的な作業はロボットに向きますが、刻々と変化する環境や多品種少量生産などに対しては、まだ認識・適応能力が不足しているからです。これらの技術を一層発展させ、人型ロボットの活躍の場を建設現場や航空機の組立などに広げていくのが研究動機の一つです。

もう一つの研究動機は、人型ロボットを通じて人を知る、ということです。人が簡単に行っている動きでも、その裏ではたくさんの筋肉や体の部分に関わり、無駄のない動きを作っています。人の動きを測って動作原理に関する仮説を立て、動きを人型ロボットで再現することで検証を行います。特に、環境との接触に

より生じる力や、筋肉が発生する力は人で直接測ることが困難です。多数のセンサーを取りつけたロボットによって力や動きを正確に測ることで、人を理解するための有用な参考データが得られます。

このように、ロボットによる動作の再現は、人の動きに対する理解を深めるという科学的探究に加え、次章に述べるように様々な使い道も考えられています。

3. 人の動きを再現する

人の動きの再現による人型ロボットの使い道のうち、主なものの一つはエンターテインメントなど動き自体に価値を見出すものです。また、人が使う道具や装置の性能を調べるなど、動きに物理的な作用を伴う別の使い道も考えられます。

第一の使い道は、具体的には人と一緒にダンスを踊ったり、また人に似た動きのレポートリーをいくつか持って、上半身で動きを再現して自然な接客対応などを行ったりすることが考えられます。

【図1】は、伝統芸能の動きをロボットで再現した研究です¹⁾。人の動きは、光学式の反射マーカをつけ、複数のカメラで動きを測定する「モーションキャプチャー」という装置で測定します。計測したマーカ位置は3次元空間上の点ですが、マーカを人のどこに付けたかと対応づけることにより、人の各関節の動きが分かります。そのように測った人の動きを、身体構造の違いを考慮してロボットで再現しているのです。これについては4.で説明します。

【図1】に関連して、例えば、伝承者が少なくなった伝統芸能舞踊の動きをデジタルデータとして保存しておき、これを再現するロボットが舞踊の師匠になる、といったことも将来考えられるかもしれません。

人の使う機器の性能を調べるという第二の使い道では、実際に人型ロボットが道具や装置を使って、商品テストをするようなイメージです。シミュレーション技術が進み、人間を計算機上で再現した「デジタルヒューマン」（デジタルツインとも呼びます）により、例えば把手や椅子の形状など、試作品を作らずに開発中の

商品の使い勝手を評価することもできます。

一方で、シミュレーションですべてを完璧に再現できるわけではなく、とりわけ接触という物理現象を精密に再現することは現状の技術でも困難な課題です。そのため、利用時に動く人との接触を伴う装置では、実際に動かして試してみることが重要です。人に近い動きを再現できる人型ロボットは、このようなテストの目的で有用と考えられます。

4. 「リターゲティング」による動作の再現

人の動きは、どのように人型ロボットで再現するのでしょうか。人とロボットは、大きさが異なるだけでなく、人は球面とそれを包む構造の関節を持つのに対し、ロボットのモーターは軸回転であり、大きく異なっています。これらの違いを吸収して、元の人の動きにできるだけ近い動きをロボットで再現する技術を「リターゲティング」と呼びます。やり方はいくつかありますが、筆者が共同で行った研究²⁾の手法を紹介します【図2】。

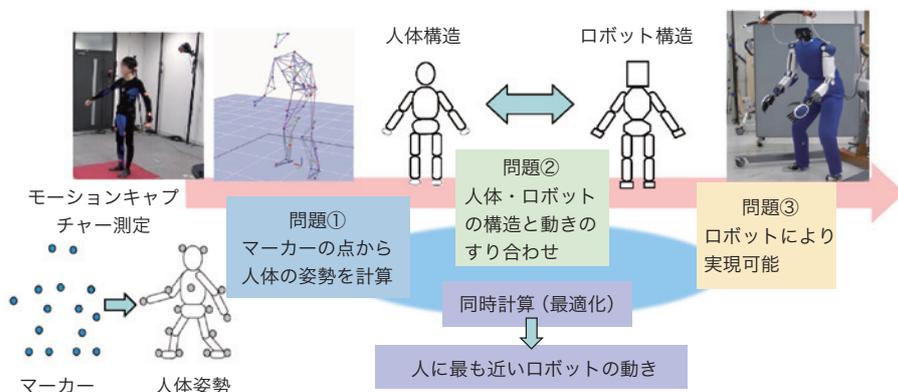
リターゲティングを実現するために、いくつか解かないといけない問題があります。モーションキャプチャーで測ったデータはマーカーの3次元空間上の点を時間軸で並べたものになります。

問題①として、測定したマーカーの点の集まりから、人の骨格構造を考慮して、一番もっともらしい関節の曲げ方を求めます。これでマーカーの点群の動きを人体の動きとして理解します。次に問題②として、人とロボットの寸法や関節構造の違いを考慮したうえで、人に最も近いロボットの動きを導き出します。一般にロボットのほうが人よりも関節の数が少ないので、腕や足の長さの違いも織り込みつつ、なるべく

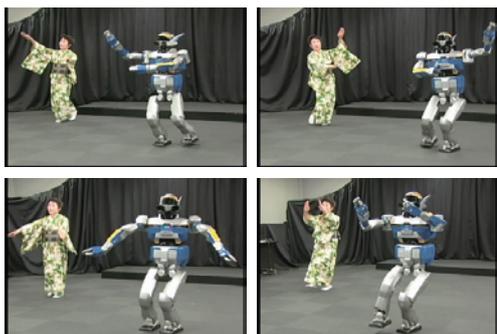
全体として全身の姿勢が重なるようにします。最後に問題③として、ロボットが自分の動きとしてきちんと実現できるようにする必要があります。例えば、関節が曲がる範囲を超えたり、バランスを崩して転倒したりしないように動きを修正します。

問題①～③を順番に解いていくと、計算の途中で動きの誤差が蓄積して、最後には人からかけはなれた動きになったりすることがあります。そこで、【図2】では、これらの問題を「同時に」解くことで、全体として人の動きになるべく近くなるロボットの動きを求めています。このように、ある変数（この場合は「ロボットの各関節の角度」）により決まる指標（この場合は「ロボット身体全体の動きの人の動きへの近さ」）を最小（場合によっては最大）にすることは「最適化計算」と呼ばれ、広く工学分野で用いられています。

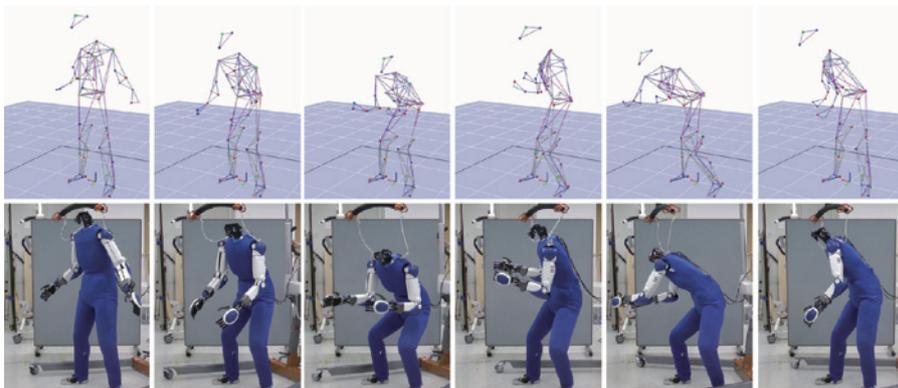
【図3】は、人が前に屈んで両手で物体を持ち上げ、横に置く動きを、産業技術総合研究所で開発された人型ロボット HRP-4 で再現した例を示しています。このロボットは、人の体形のデータベースの平均をもとに、手足の長さが人に近い値となるように設計されています。連続写真に示す通り、計測した人の全身の動き（上段）が、下段に示すロボットにより再現されていることが分かります。



【図2】ロボットによる人の運動の再現手法²⁾



【図1】人型ロボットによる伝統舞踊の再現²⁾



【図3】ロボットで再現した人間動作の例



【図4】様々なパワースーツ：左から HAL（Cyberdyne 社）、マッスルスーツ（イノフィス社）、ATOUN 社

5. パワースーツの性能を調べる

5.1. 定量的な評価の必要性

流通や工場での重量物を運搬したり、また介護現場で高齢者の身体を支えたりすることに起因する、腰痛などの職業関連疾病は以前から問題になっています。厚生労働省などから、重量物の持ち上げを行う際に、腰痛を防ぐための指針が示されていますが、ロボット技術などによる作業者や介護者の負担軽減も、その解決に貢献する重要な技術と位置付けられます。

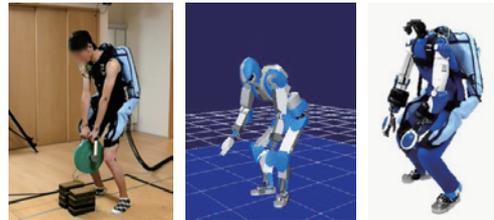
このような問題解決のため、装着型のアシストスーツの開発が進んでおり、様々な製品がすでに市場に出ています。これらが普及するためには、どのくらいの負担軽減の効果があるかを示すことも重要になります。

前述したデジタルヒューマンを用いたシミュレーションの活用も考えられます。しかしながら、身体の負担を軽減する装着型の支援機器は、人との接触部位も大きく、利用者の負担がどのくらい減ったのかをシミュレーションだけで正確に測ることは難しいのです。

したがってこれらの製品に対しては、通常協力者を募って人間工学実験と呼ばれる実験を行い、アンケートによりどのくらい楽になったかを調べることが行われます。ただし、これらは主観的な感覚に基づくので、「定性的」に腰の負担が減ったように感じる、というレベルにとどまり、客観的な観点から「定量的」に負担が何 kg 減ったかまでは分かりません。

自動車を購入する場合を考えてみましょう。車のカタログには燃費や出力の数値が書かれています。これをもとに、燃費は悪くても力強い走りがしたい、あるいはそれほど速くなくても燃費が良い車が欲しい、など比較検討して自分の要求に合った車を選ぶでしょう。装着型支援機器でも同様で、瞬間的なパワーが欲しいのか、長い時間平均的にサポートされたいのかなど、用途に応じて定量的な目安をもとに選ぶことが、利用者の利便性向上と製品の普及につながります。

そこで、実際の利用状況に近い環境で、支援装置を



人動作の計測 動作リターゲッティング 人型ロボットによるテスト

【図5】人型ロボットによるマッスルスーツのテスト

実際に装着して負担軽減を計測できる人型ロボットが活用できるのです。

5.2. 人型ロボットで定量的に性能を測る

実際に装着型のパワースーツの負担軽減効果を人型ロボットで測った事例を紹介しましょう。

【図4】に示した製品群のうち、真ん中のものは「マッスルスーツ」というパワースーツで、東京理科大学の小林宏教授により開発され、株式会社イノフィスが製造販売を行っています。他の2点が電気式のモーターにより駆動されるのに対し、マッスルスーツは空気圧を用いた「人工筋肉」を駆動源としていることが特徴です。この人工筋肉は非常に強力で、これを装着することで、25 kg の荷物を楽々と持ち上げることができます。

マッスルスーツ単体で発生力を測ることはできます。しかし、腰の負担がどのくらい減るかを知るためには、実際にこれを装着し、荷物を持ち上げて腰にかかる力を測る必要があります。前述のように、このシミュレーションは困難であり、人の腰にかかる力は直接測れないので、アンケート等で使用感を調べることとなります。筋電計という筋肉の出力信号を測る測定器もありますが、ノイズが多く、間接的な計測という点も問題です。

これに対して、スーツを装着した人型ロボットに、人の持ち上げ動作を再現させて、ロボットのセンサーで直接腰にかかる力を測ることができれば、より実際に近い状況で腰の負担軽減を定量的に推定できます。

【図5】は、実際に人型ロボットにより性能テストを行っている様子を示しています。まず人の持ち上げ動作を測定し、動作リターゲッティングにより人型ロボットにこれを移植し、シミュレーションで動作確認をします。その後、実際に人型ロボットがマッスルスーツを装着して持ち上げ動作を再現します。このとき人型ロボットは、センサーでスーツが力を出し始めたことを検出し、タイミングを合わせて動き出すように

制御します³⁾。マッスルスーツを装着しているときとしていないときでモーターの出力を測定し比較することで、どのくらい腰の負担が軽くなったかを求めます。

【図6】に実験結果を示します。横軸は経過時間、縦軸は計測した持ち上げ時の腰の負担で、かかる力と距離を乗じた「回転モーメント」(単位はNm)を示しています。回転モーメントの負の値の絶対値が大きくなるほど、つまり縦軸で下に行くほど、腰の負担が大きくなります。赤い曲線はスーツ装着なし、青は装着ありの場合です。グラフから分かるように、スーツを装着することにより、大きく腰の負担が減っていることが分かります。スーツの出力は最大より低く設定しましたが、支援するモーメントは25~30 Nm程度に達しています。例えば地面に投影した腰の位置の20 cm前に物体を置いて持ち上げる場合、約12.5~15 kgという大きな支援力を発揮していることが分かります。使用する人自身も力を発するので、サポートを受けるとかなり楽に重量物を持ち上げられます。このように、人型ロボットを使うことで、作業の負担軽減の効果を定量的に示すことができました。

5.3. 「JIS」規格への発展

人型ロボットの普及にはまだ時間がかかるのが現状です。そこで、成果活用の一環として、腰負担の軽減を目的とする支援装置に対象を絞って、この方法を普及させる取り組みを行いました。

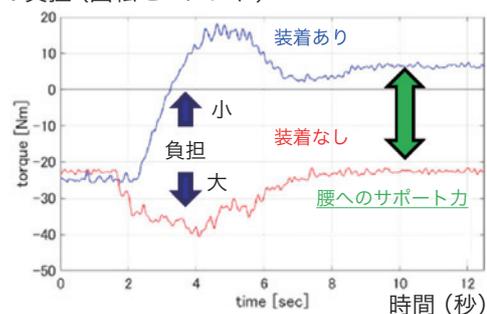
日本産業規格(JIS規格)は、工業・サービス分野でユーザーの利便性のための形状や材質の基準や、製品の比較検討のための共通の「ものさし」を提供する仕組みです。身近な例では、家電用コンセントや鉛筆などの形状、前述の自動車の燃費にもJIS規格が定められています。

膝と腰の回転だけを再現する、腰の負担の軽減を対象とした簡易的な試験装置【図7】を用いることで、【図6】にある腰が発生する回転モーメントに加え、直接腰に加わる力(圧縮力)も計測します。これらの値が、どのタイミングでどのくらい減少するかを計測することで、支援装置の性能が特徴づけられます⁴⁾。この成果は、正式な規格(JIS B 8456-1)の制定につながっています。

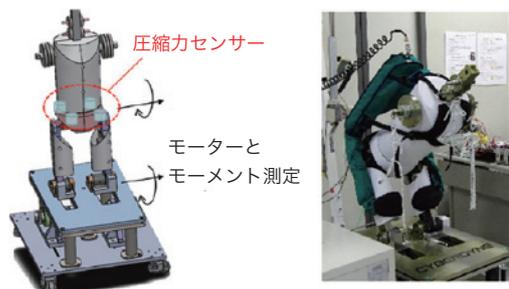
6. おわりに

本稿では、人型ロボットの研究として、人動作の再

腰の負担(回転モーメント)



【図6】ロボットによる支援力の測定実験結果



【図7】JIS規格用測定装置と支援装置の試験

現について、その研究の背景や、方法や応用について解説しました。今回は重量物の持ち上げをサポートする装置を主な対象としましたが、最近は歩行や腕の動作を助ける装着型の支援装置も開発されてきています。人が使う様々な装置を人と同様に使える人型ロボットができれば、より客観的で定量的なテストを人に代わって効率的に行うことができます。

一方で、人の動きの原理には未解決なことがたくさんあります。現在は測った動きを再現することはできませんが、運ぶ荷物の重さや置く場所などの条件が変わったときに臨機応変に動きを変えることはできていません。研究をさらに進めて、このような人の動きの原理の解明に取り組みつつ、人型ロボットによる高負荷な作業の代替や製品テストなどに应用していきたいと考えています。

【参考文献】

- 1) 中岡他“脚タスクモデルを用いた2足歩行ヒューマノイドロボットによる人の舞踊動作の再現”, 日本ロボット学会誌 24-3, 388-399, 2006.
- 2) 鮎澤, 森澤, 吉田“人の動作特徴を陽に組み込み可能なヒューマノイド動作再現”, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015.
- 3) 伊藤他“ヒューマノイドを用いた人間動作追従制御による装着型支援機器の評価”, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 2017.
- 4) 鍋瀧, 鮎澤, 吉田“JIS B 8456-1: 世界初の腰補助ロボット製品規格”, 第35回日本ロボット学会学術講演会 2017.